不同加工工艺对玉米纤维饲料营养价值的影响

郝小燕　刘　岩　张广宁　孙凯晶　王馨影　杨金山　张永根*

(东北农业大学动物科学技术学院，哈尔滨 150030)

摘　要：本试验以干玉米纤维饲料（DCGF）和湿玉米纤维饲料（WCGF）为原料，分析加工工艺对玉米纤维饲料营养价值的影响。选取 3 头装有永久性瘤胃瘘管的干奶期荷斯坦奶牛为试验动物，采用常规方法测定 DCGF 和 WCGF 营养成分含量，采用尼龙袋法测定瘤胃降解特性，采用三步体外法测定瘤胃非降解蛋白质(RUP)的小肠消化率，采用 NRC 模型预测代谢蛋白质和必需氨基酸供给量。结果表明：1）DCGF 常规营养成分中除中性洗涤纤维（NDF）、中性洗涤不溶粗蛋白质（NDICP）、酸性洗涤不溶粗蛋白质（ADICP）含量显著高于 WCGF（$P<0.05$）外，其他营养成分含量均差异不显著（$P>0.05$）；2）DCGF 和 WCGF 的瘤胃 NDF 降解率差异不显著（$P>0.05$），而 DCGF 的瘤胃干物质（4、24、48 h）、粗蛋白质（CP）降解率（12、24、48 和 72 h）及有效降解率显著低于 WCGF（$P<0.05$）；3）DCGF 的 RUP 含量显著高于 WCGF（$P<0.05$），而总可消化养分和微生物蛋白质、代谢蛋白质含量与 DCGF 差异不显著（$P>0.05$）；4）DCGF 的 RUP 的小肠消化率显著低于 WCGF（$P<0.05$），但总可消化蛋白质含量差异不显著（$P>0.05$）；5）饲料 RUP 提供的必需氨基酸中，DCGF 的 RUP 提供的组氨酸（His）、苯丙氨酸（Phe）、异亮氨酸（Ile）以及总必需氨基酸含量显著高于 WCGF（$P<0.05$）。综合得出，DCGF 和 WCGF 都含有高含量的可利用纤维和蛋白质，可以作为奶牛良好的纤维和蛋白质源饲料，但 DCGF 的瘤胃 CP 降解率和 RUP 的小肠消化率较低，可能影响其蛋白质和氨基酸的营养价值。

关键词：玉米纤维饲料；瘤胃降解率；小肠消化率；氨基酸

中图分类号：S816

近年来我国玉米深加工业发展迅速，玉米在国内的主要去向之一便是玉米深加工，用于生产酒精、淀粉等。玉米深加工过程中约伴随产生 30%的副产物，主要有玉米蛋白粉、玉米纤维饲料、胚芽饼/粕、酒精糟等。这些副产物含有丰富的营养成分，是畜禽良好的饲料资源[1]。

收稿日期：2017-02-01
基金项目：国家奶牛产业技术体系项目（CARS-37）
作者简介：郝小燕（1990-），女，内蒙古乌兰察布人，博士，研究方向为反刍动物营养。E-mail: haoxiaoyan1990@sina.com
*通信作者：张永根，教授，博士生导师，E-mail: zhangyonggen@sina.com

湿磨法生产玉米淀粉的加工流程大致可以分为“浸泡、磨碎、分离”3 个基本的生产阶段。玉米的浸泡是指将净化后的玉米浸泡在浓度为 0.2%亚硫酸水溶液中，浸泡温度为 50 ℃左右，连续浸泡 60~70 h[2]。浸泡的主要目的是软化玉米，降低玉米的机械强度以便磨碎；其次是破坏玉米胚乳细胞中的蛋白质结构以释放出游离淀粉，便于分离淀粉。完成浸泡后的浸泡液为也称稀玉米浆，其干物质（DM）含量为 7%~9%，pH 为 3.9~4.1。稀玉米浆经过三效降膜式蒸发系统，浓缩成 DM 含量为 40%左右的浓缩玉米浆以备用[2]。浸泡后的玉米水分含量在 45%左右，经过 3 次磨碎后将胚芽、淀粉、种皮等分离，淀粉乳经沉淀、洗涤、脱纤维、干燥等步骤生产出淀粉产品。胚芽经过洗涤、脱水、干燥等工序后用于生产玉米油和玉米胚芽粕。而分离得到的玉米纤维（玉米种皮、胚芽根、根帽）经过逆流洗涤后脱水，DM 含量在 40%左右[3]。玉米纤维按照一定比例[与成品粗蛋白质（crude protein，CP）含量有关]与浓缩玉米浆混合，经过大型搅拌机充分混匀后，制成的 DM 含量 40%左右的湿玉米纤维饲料（wet corn gluten feed,WCGF）来直接用作动物饲料，或者将 WCGF 经过管束式干燥机干燥至水分含量 12%左右，即制成干玉米纤维饲料（dry corn gluten feed,DCGF）[4]。在国外，大部分玉米纤维饲料以 WCGF 的形式被牧场利用，并获得良好的饲养效果[5-6]。但是，因受到贮存和运输条件的限制，国内很多生产厂家多以 DCGF 形式生产。

不同加工工艺可能会影响饲料营养价值，目前有关 WCGF 和 DCGF 营养价值的比较还缺乏研究。因此，本试验从营养成分含量、瘤胃降解特性、代谢蛋白质和氨基酸供给量方面对比 WCGF 和 DCGF 营养价值的差异，探究加热烘干对玉米纤维饲料营养价值的影响，为科学、合理利用玉米纤维饲料提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验动物与试验材料

选取 3 头体重 600 kg 左右健康并装有永久性瘤胃瘘管的干奶期荷斯坦奶牛为试验动物。DCGF 和 WCGF 采自吉林省松原市嘉吉生化有限公司和飞鹤原生态牧场的各 2 个批次，各 4 个饲料样品，其中 WCGF 于 65 ℃烘干 48 h，风干样粉碎过 1 mm 筛备用。

1.2 基础饲粮与饲养管理

试验牛的基础饲粮参照 NRC（2001）[7]奶牛营养需要配制，其组成及营养水平见表 1。每天饲喂 2 次（06:00 和 18:00），自由饮水。

表 1　基础饲粮组成及营养水平

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet　　%

项目 Items	含量 Content
原料（风干基础） Ingredients (air-dry basis)	
玉米青贮 Corn silage	30.02
羊草 Chinensis wildrye	10.13
苜蓿 Alfalfa	20.05
玉米 Corn	25.20
麦麸 Wheat bran	3.20
豆粕 Soybean beet	4.80
棉籽粕 Cottonseed meal	2.90
干酒糟及其可溶物 DDGS	2.00
石粉 Limestone	0.20
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.70
食盐 NaCl	0.40
预混料 Premix1)	0.40
合计 Total	100.00
营养水平（干物质基础） Nutrient levels （DM basis）2)	
干物质 DM	47.04
粗蛋白质 CP	12.65
中性洗涤纤维 NDF	52.13
酸性洗涤纤维 ADF	24.30
钙 Ca	0.59
磷 P	0.42
产奶净能 NE_L/（MJ/kg）	6.00

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of the diet：混合维生素 Mixed vitamins 600 000 IU，Cu 800 mg，Zn 11 000 mg，Mn 3 000 mg，Se 60 mg，I 220 mg，Co 55 mg。

2) 产奶净能为计算值，其他的为实测值。产奶净能（MJ/kg）=9.62×消化能（MJ/kg）-0.396 0[8]。NE_L was a calculated value，　while the others were measured values. NE_L（MJ/kg）=9.62×DE（MJ/kg）-0.396 0[8].

1.3　试验方法

1.3.1　营养成分含量

DCGF 和 WCGF 的 DM、粗灰分（ash）、CP、粗脂肪（ether extract，EE）等常规营养成分含量参照 AOAC（1997）[9]中的方法测定；淀粉含量参照张旭等[10]的酶法，试剂盒采购自上海荣盛生物制药公司；中性洗涤纤维（neutral detergent fiber，NDF）、酸性洗涤纤维（acid detergent fiber，ADF）、酸性洗涤木质素（acid detergent lignin，ADL）、中性洗涤不溶粗蛋白质（neutral detergent insoluble crude protein，NDICP）和酸性洗涤不溶粗蛋白质（acid

detergent insoluble crude protein，ADICP）的含量按照 Van Soest 等[11]方法测定；非蛋白氮（non-protein nitrogen，NPN）和可溶性蛋白质（soluble protein，SP）含量参照康奈尔净碳水化合物-蛋白质体系（CNCPS）方法测定[12]。每个样品每个指标重复测定 3 次。

1.3.2　尼龙袋法测定瘤胃降解率

尼龙袋法的操作参照 Nuez-Ortín 等[13]介绍的步骤。称取 7 g（精确到 0.000 1 g）装入面积为 10 cm×20 cm、孔径为 50 μm 的尼龙袋中，样品重尼龙袋表面的比率为 17.5 mg/cm^2。尼龙袋置于 3 头试验牛瘤胃中分别培养 0、4、8、12、24、36、48、72 h 后取出，取出的尼龙袋立即用冷自来水冲洗以去除尼龙袋表面的食糜及残渣，终止微生物的发酵活动。继续用冷自来水清洗至水清、无味后不甩干，于 65 ℃烘干 48 h，将袋中样品粉碎待测营养成分含量。0~12 h 每个时间点设 3 个平行尼龙袋，16~48 h 每个时间点设 4 个平行尼龙袋，瘤胃内尼龙袋不超过 30 个。参照 Ørskow 等[14]的非线性模型计算瘤胃动态降解参数：

P=100×（降解前样品中营养成分含量-降解后样品中营养成分含量）/降解前样品中营养成分含量；

$$P=a+b[1-\exp(-ct)]。$$

式中：P 为各时间点营养物质降解率（%）；a 为快速降解部分（可溶性部分）含量(%)；b 为慢速降解部分含量(%)；c 为慢速降解部分的降解速率（%/h）（c>0），a+b 为潜在可降解部分（%）。

有效降解率计算公式如下：

$$ED=a+bc/(c+Kp)$$ [13]。

式中：ED 为有效降解率（%）；Kp 为饲料在瘤胃的外流速率，值取 4.6%/h[7]。

1.3.3　三步体外法测定瘤胃非降解蛋白质(rumen undegraded protein，RUP)的小肠消化率

采用改进的三步体外法测定 RUP 的小肠消化率[15-16]。称取在瘤胃培养 16 h 后尼龙袋内的残渣 5 g 于 50 mL 离心管中，加入 10 mL 胃蛋白酶溶液（Sigma p-7012，Sigma-Aldrich 公司，美国）(pH=1.9)，于 37 ℃水浴摇床中培养 60 min。然后在培养液中加入 13.5 mL 胰蛋白酶溶液（Sigma p-7545，Sigma-Aldrich 公司，美国）和 0.5 mL 浓度为 1 mol/L 的 NaOH 溶液，使培养液 pH 为 7.9。离心管在 38 ℃水浴摇床中继续培养 24 h，且每隔 8 h 漩涡振荡 1 次。培养结束后在培养液中加入 3 mL 100%的三氯乙酸（TCA），漩涡混匀后于 10 000×g 离心 15

min。凯氏定氮法测定培养液 CP 的含量，培养液中 CP 的含量与 16 h 瘤胃降解残渣中 CP 含量的比例即为 RUP 的小肠消化率。

$$IDP=\mathrm{RUP}\times dIDP;$$

$$TDP=IDP+RDP。$$

式中：*IDP* 为小肠可消化蛋白质；*dIDP* 为 RUP 的小肠消化率（%）；*TDP* 为总可消化蛋白质；*RDP* 为瘤胃可降解蛋白质。

1.3.4 NRC 模型预测代谢蛋白质供给量

使用 NRC（2001）[7]中的模型来估测 2 种饲料的潜在营养物质供给量，包括总可消化养分、微生物蛋白质、小肠可吸收微生物蛋白质、小肠可吸收 RUP、内源真蛋白质、小肠可吸收内源真蛋白质、代谢蛋白质。根据 NRC 模型，饲料营养物质供给量公式[7]如下：

$$TDN=dNFC+dCP+(dFA\times2.25)+dNDF-7;$$

$$MCP=0.13\times TDN;$$

$$AMCP=0.80\times0.80\times MCP;$$

$$ARUP=RUP\times dIDP;$$

$$ECP=6.25\times1.9\times\mathrm{DM};$$

$$AECP=0.50\times0.80\times ECP;$$

$$MP=ARUP+AMCP+AECP。$$

式中：*TDN* 为总可消化养分（g/kg DM)；*dNFC* 为可消化非纤维性碳水化合物（NFC）(%)；*dCP* 为可消化 CP(%)；*dFA* 为可消化脂肪酸（FA）(%)；*dNDF* 为可消化 NDF(%)；*MCP* 为微生物蛋白质（g/kg DM)；*AMCP* 为小肠可吸收微生物蛋白质（g/kg DM)；*ARUP* 为小肠可吸收 RUP（g/kg DM)；*ECP* 为内源真蛋白质（g/kg DM)；*AECP* 为小肠可吸收内源真蛋白质（g/kg DM)；*MP* 为代谢蛋白质（g/kg DM)。

1.3.5 NRC 模型预测氨基酸供给量

氨基酸含量采用酸水解法测定[17]，水解液于日立 L-8800 型全自动氨基酸分析仪上测定。检测波长：440 和 570 nm；柱温：57 ℃；反应柱温度：135 ℃；流速：0.400 mL/min；柱后衍生试剂流速：0.350 mL/min；进样量：20 μL。

依据 NRC（2001）[7]的预测模型，计算 RUP 提供的必需氨基酸含量：

$$EAA_{i\mathrm{RUP}}=\mathrm{CP}\times\mathrm{RUP}\times EAA_i\times 0.001;$$

$$TEAA_{\mathrm{RUP}}=\Sigma EAA_{i\mathrm{RUP}}。$$

式中：$\mathrm{EAA}_{i\mathrm{RUP}}$ 为饲料 RUP 提供的某种必需氨基酸含量（g/kg DM）；EAA_i 为某种必需氨基酸含量（% CP）；$TEAA_{\mathrm{RUP}}$ 为饲料 RUP 提供的总必需氨基酸含量（g/kg DM）。

1.4　数据统计分析

数据采用 SAS 9.2 NLIN 程序计算瘤胃动态降解参数，数据采用 MIXED 模型进行统计分析。

2　结果与分析

2.1　WCGF 和 DCGF 营养成分含量

DCGF 和 WCGF 营养成分含量见表 2。2 种饲料的粗灰分、EE 含量差异不显著（P>0.05）。在碳水化合物方面，DCGF 含有较高水平的 NDF 含量，显著高于 WCGF（P<0.05，520.9 vs. 490.8 g/kg DM），但淀粉、ADF、ADL 含量差异不显著（P>0.05）。在蛋白质成分方面，2 种饲料 CP 含量差异不显著（P>0.05），但 DCGF 的 NDICP、ADICP 以及 NPN 含量均显著高于 WCGF（P<0.05）。

表 2　DCGF 和 WCGF 营养成分含量

Table 2　Nutrient composition contents of DCGF and WCGF　（n=4）　　g/kg DM

项目 Items	干玉米纤维饲料 DCGF	湿玉米纤维饲料 WCGF
干物质 DM/(g/kg)	938.8±9.1[a]	363.5±4.1[b]
粗灰分 Ash	59.3±4.3	43.7±6.2
粗脂肪 EE	27.2±3.1	23.5±2.9
淀粉 Starch	105.0±6.6	91.2±7.4
中性洗涤纤维 NDF	520.9±3.7[a]	490.8±4.3[b]
酸性洗涤纤维 ADF	148.0±2.5	139.6±6.0
酸性洗涤木质素 ADL	27.9±5.5	25.3±4.8
粗蛋白质 CP	210.3±6.9	202.5±9.5
中性洗涤不溶粗蛋白质 NDICP	34.5±2.1[a]	28.9±1.6[b]
酸性洗涤不溶粗蛋白质 ADICP	3.4±0.4[a]	1.1±0.2[b]
可溶性蛋白质 SP	128.0±6.2	109.1±5.3
非蛋白氮 NPN	119.0±5.9[a]	97.3±3.3[b]

同行数据肩标不同字母表示差异显著（P<0.05）,无字母表示差异不显著（P>0.05）。表 5、表 6 和表 7 同。

In the same row, values with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with no

letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as Table 5, Table 6 and Table 7.

2.2 WCGF 和 DCGF 的 DM、CP 及 NDF 瘤胃降解特性

DCGF 和 WCGF 在瘤胃不同时间点的 DM、CP 及 NDF 降解率见表 3。随着饲料在瘤胃中降解时间的延长，DM、CP、NDF 在瘤胃内降解率都在逐渐增加。DCGF 的 DM 降解率在 4、24、48 h 时显著低于 WCGF(P<0.05)，其他时间点二者 DM 降解率差异不显著(P>0.05)。2 种饲料 CP 降解率在 8 h 之前差异不显著（P>0.05），12 h 之后 WCGF 的 CP 降解率较高，均显著高于 DCGF（P<0.05），72 h 时 WCGF 的 CP 降解率达到 91.51%。2 种饲料 NDF 降解率在各时间点差异不显著（P>0.05），说明 2 种饲料 NDF 在瘤胃中的降解特性相似。

应用 SAS 9.2 软件中的非线性拟合法分析 DCGF 和 WCGF 的 DM、CP、NDF 瘤胃动态降解参数，列入表 4。2 种饲料 DM 快速降解部分含量差异不显著（P>0.05），而 DCGF 的 DM 慢速降解部分显著高于 WCGF（P<0.05），慢速降解部分的降解速率和有效降解率显著低于 WCGF（P<0.05）。WCGF 的 CP 慢速降解部分和潜在可降解部分含量显著高于 DCGF（P<0.05），快速降解部分含量差异不显著（P>0.05），WCGF 的 CP 有效降解率显著高于 DCGF（67.01% CP vs. 64.08% CP，P<0.05）。2 种饲料 NDF 的各瘤胃降解参数差异均不显著（P>0.05）。

表 3 DCGF 和 WCGF 在瘤胃不同时间点的 DM、CP 及 NDF 降解率

Table 3 DM, CP and NDF degradability of DCGF and WCGF in rumen at different time points （n=4） % DM

项目 Items		取样时间点 Sampling time/h					
		4	8	12	24	48	72
干物质降解率 DM degradability	干玉米纤维饲料 DCGF	31.55±0.67^{b}	38.03±0.78	44.94±0.78	58.14±1.24^{b}	68.53±0.56^{b}	78.54±0.78
	湿玉米纤维饲料 WCGF	36.05±0.92^{a}	40.98±0.74	48.10±0.22	63.22±0.65^{a}	72.19±1.12^{a}	77.83±0.59
粗蛋白质降解率 CP degradability	干玉米纤维饲料 DCGF	48.16±1.12	58.12±0.99	63.79±1.06^{b}	69.03±0.11^{b}	78.84±1.17^{b}	84.38±0.97^{b}
	湿玉米纤维饲料 WCGF	50.43±0.76	57.47±0.63	69.99±0.64^{a}	73.55±0.83^{a}	85.32±0.78^{a}	91.51±0.62^{a}
中性洗涤纤维降解率 NDF degradability	干玉米纤维饲料 DCGF	11.53±0.62	18.95±0.68	29.58±0.43	45.89±0.89	67.60±0.53	84.81±0.53
	湿玉米纤维饲料 WCGF	12.72±0.43	20.30±0.85	28.82±0.28	48.80±1.64	69.44±1.20	86.51±0.97

同一项目、同列数据肩标不同字母表示差异显著，(P<0.05)，无字母表示差异不显著（P>0.05）。表 4 同。

In the same column, values of the same item with different letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as Table 4.

表 4 DCGF 和 WCGF 的 DM、CP、NDF 瘤胃动态降解参数

Table 4 Ruminal dynamic degradation parameters of DM,CP and NDF of DCGF and WCGF （n=4）

项目 Items	快速降解部分 Rapidly	慢速降解部分 Slowly	潜在可降解部分 Potential	慢速降解部分的降解速率 Degradation	有效降解率 Effective

		degraded fraction/%	degraded fraction/%	degraded fraction/%	speed of slowly degraded fraction/（%/h）	degradability/%
干物质 DM	干玉米纤维饲料 DCGF	24.54±0.56	57.32±0.25[a]	81.86±1.06	3.48±0.17[b]	49.22±0.12[b]
	湿玉米纤维饲料 WCGF	26.14±0.93	53.39±1.56[b]	79.62±0.61	4.59±0.11[a]	52.89±0.40[a]
粗蛋白质 CP	干玉米纤维饲料 DCGF	43.41±0.18	40.92±1.09[b]	84.33±1.27[b]	3.55±0.19[b]	64.18±0.23[b]
	湿玉米纤维饲料 WCGF	42.34±0.56	48.07±0.16[a]	91.41±0.40[a]	4.85±0.13[a]	67.01±0.45[a]
中性洗涤纤维 NDF	干玉米纤维饲料 DCGF	1.37±0.52	91.61±0.87	84.97±0.35	3.47±0.09	40.76±0.81
	湿玉米纤维饲料 WCGF	1.78±1.05	92.97±0.69	84.75±0.50	3.56±0.13	42.34±0.76

2.3 DCGF 和 WCGF 蛋白质小肠消化特性的比较

DCGF 和 WCGF 蛋白质小肠消化特性的比较见表 5。DCGF 的 RUP 的小肠消化率显著低于 WCGF（$P<0.05$，65.31% vs. 71.49%）。2 种饲料的的小肠可消化蛋白质和总可消化蛋白质含量差异不显著($P>0.05$)。

表 5　DCGF 和 WCGF 蛋白质小肠消化特性的比较

Table 5　Comparison of intestinal digestion characteristic of protein of DCGF and WCGF （*n*=4）

项目 Items	干玉米纤维饲料 DCGF	湿玉米纤维饲料 WCGF
瘤胃非降解蛋白质的小肠消化率 Intestinal degradability of RUP/%	65.31±0.97[b]	71.49±1.24[a]
小肠可消化蛋白质 Intestinal digestible protein/（% CP）	23.38±0.77	23.60±0.68
小肠可消化蛋白质 Intestinal digestible protein/（g/kg DM）	49.20±1.24	47.73±1.67
总可消化蛋白质 Total digestible protein/（% CP）	87.62±0.77	90.62±0.72
总可消化蛋白质 Total digestible protein/（g/kg DM）	184.11 ±2.65	183.21±3.09

2.4 NRC 模型估测 DCGF 和 WCGF 代谢蛋白质供给量

NRC 模型预测 DCGF 和 WCGF 代谢蛋白质供给量结果见表 6。2 种饲料的总可消化养分含量差异不显著（$P>0.05$），相应地，微生物蛋白质和小肠可吸收微生物蛋白质含量差异也不显著($P>0.05$)。2 种饲料的蛋白质在瘤胃中的降解特点不同，DCGF 的 RUP 含量显著高于 WCGF（$P<0.05$，75.30 g/kg DM vs. 66.80 g/kg DM）；由于 RUP 的小肠消化率的差异，导致 2 种饲料小肠可吸收 RUP 含量差异不显著($P>0.05$)；最终 DCGF 和 WCGF 的代谢蛋白质含量差异不显著($P>0.05$)，分别为 110.90 和 108.42 g/kg DM。

表 6　NRC 模型预测 DCGF 和 WCGF 代谢蛋白质供给量

Table 6　Supplemental amount of metabolizable protein of DCGF and WCGF predicted NRC model （*n*=4）

g/kg DM

项目 Items	干玉米纤维饲料 DCGF	湿玉米纤维饲料 WCGF
总可消化养分 Total digestible nutrients	688.91±5.23	708.23±3.71
瘤胃非降解蛋白质 RUP	75.30±1.41[a]	66.80±1.27[b]
微生物蛋白质 Microbial protein	89.63±0.68	92.01±0.48
小肠可吸收微生物蛋白质 Intestinal absorbable microbial protein	57.31±0.44	58.92±0.31
小肠可吸收瘤胃非降解蛋白质 Intestinal absorbable RUP	49.20±1.24	47.81±1.67

内源真蛋白质 Endogenous true protein	11.70±1.31^{a}	4.33±1.12^{b}
小肠可吸收内源真蛋白质 Intestinal absorbable endogenous true protein	4.51±0.91^{a}	1.70±0.70^{b}
代谢蛋白质 Metabolizable protein	110.90±1.10	108.42±1.45

2.5 DCGF 和 WCGF 必需氨基酸营养价值

DCGF 和 WCGF 必需氨基酸营养价值见表 7。2 种饲料必需氨基酸中除异亮氨酸(Ile)、苏氨酸(Thr)和总必需氨基酸(TEAA)外，其余各种饲料必需氨基酸含量差异不显著($P>0.05$)；而 RUP 提供的必需氨基酸中，DCGF 的组氨酸（His）、苯丙氨酸（Phe）、Ile 含量显著高于 WCGF（$P<0.05$），其余 RUP 提供的必需氨基酸含量差异均不显著（$P>0.05$），但 DCGF 的 RUP 提供的 TEAA 含量显著高于 WCGF（26.33 g/kg DM vs. 24.43 g/kg DM）。DCGF 中 RUP 提供的 Lys 和 Met 含量分别为 2.72 和 1.06 g/kg DM，WCGF 中分别为 2.57 和 1.01g/kg DM；2 种饲料 Lys：Met 分别为 2.56 和 2.54，说明 Lys 为第 1 限制性氨基酸，且氨基酸平衡性较差。

表 7 DCGF 和 WCGF 必需氨基酸营养价值

Table 7 The nutritional value of amino acids for DCGF and WCGF （n=4）

项目 Items	干玉米纤维饲料 DCGF	湿玉米纤维饲料 WCGF
饲料必需氨基酸 Feed EAA/% CP		
赖氨酸 Lys	3.61±0.05	3.84±0.08
蛋氨酸 Met	1.41±0.04	1.51±0.04
组氨酸 His	3.25±0.09	3.43±0.10
精氨酸 Arg	4.00±0.11	4.34±0.14
苯丙氨酸 Phe	3.14±0.08	3.38±0.07
缬氨酸 Val	4.24±0.18	4.64±0.10
异亮氨酸 Ile	8.65±0.13^{b}	9.27±0.15^{a}
亮氨酸 Leu	2.58±0.09	2.83±0.05
苏氨酸 Thr	3.26±0.10^{b}	3.73±0.08^{a}
总必需氨基酸 TEAA	34.60±0.64^{b}	36.94±0.30^{a}
瘤胃非降解蛋白质提供的必需氨基酸 EAA provided by RUP/（g/kg DM）		
赖氨酸 Lys	2.72±0.04	2.57±0.05
蛋氨酸 Met	1.06±0.03	1.01±0.03
组氨酸 His	2.45±0.04^{a}	2.29±0.03^{b}
精氨酸 Arg	2.99±0.08	2.90±0.10
苯丙氨酸 Phe	2.61±0.02^{a}	2.06±0.02^{b}
缬氨酸 Val	3.19±0.06	3.10±0.07
异亮氨酸 Ile	6.91±0.04^{a}	6.12±0.03^{b}
亮氨酸 Leu	1.94±0.09	1.89±0.03
苏氨酸 Thr	2.46±0.08	2.49±0.06
总必需氨基酸 TEAA	26.33±0.09^{a}	24.43±0.11^{b}

3 讨 论

3.1 WCGF 和 DCGF 营养成分含量

本试验全面分析比较了 WCGF 和 DCGF 的营养成分差异，从常规营养成分上可以看出，2 种饲料均含有较高含量的 NDF、CP 和淀粉，是奶牛良好的纤维和蛋白质来源。其中 DCGF 的 NDF 含量显著高于 WCGF，ADF、ADL 和淀粉含量与 WCGF 差异不显著，因此在能量方面可能更具有优势。本试验测得 WCGF 营养成分含量与潘春芳[3]所报道结果相比，除 NDICP 含量略低外，其他营养成分含量基本接近，但与国外学者报道的 DCGF、WCGF 营养成分含量存在一定的差异，原因可能是用于加工淀粉的玉米本身在品种和质量上存在差异[18-19]。DCGF 的 DM、CP、NDF 和 ADF 含量与林谦等[1]研究结果相当，但 EE 和粗灰分含量较高，可能是不同产地和加工程序所致的差异。本试验中 DCGF 的 NDICP、ADICP 含量显著高于 WCGF，说明 DCGF 蛋白质的可降解程度低于 WCGF，原因可能是玉米皮喷浆后烘干的过程中热变性蛋白质（美拉德反应的产物）比例增加所造成的[12]。饲料蛋白质的加工方法不同，会造成蛋白质分子内和分子间以及蛋白质与碳水化合物之间的三维立体结构及化学键（如交联键）产生差异[20]。

3.2 WCGF 和 DCGF 的 DM、CP 及 NDF 瘤胃降解特性

目前有关玉米纤维饲料在瘤胃中的降解规律的研究资料较少，可参照比较的试验数据很有限，本试验中 WCGF 瘤胃降解特性结果与李洋[21]研究结果相近。饲料在瘤胃中的降解主要取决于其发酵的难易程度和在瘤胃内的滞留时间[22]，过瘤胃速度绝大多数取决于饲料的比重和颗粒大小[23]。颗粒小可与瘤胃充分接触，在瘤胃内可充分发酵，促进饲料在瘤胃内的降解。本试验中，在瘤胃降解的 72 h 之内，DCGF 的 DM 降解率在 4、24 和 48 h 时低于 WCGF，其他时间点差异不显著，说明 WCGF 比 DCGF 更容易降解。2 种饲料 DM 降解率在起始时（4 h）较高，24 h 后趋于平稳，说明其 DM 主要在 24 h 之内降解。DCGF 的 DM 慢速降解部分含量高于 WCGF，但慢速降解部分的降解速率显著低于 WCGF，DM 有效降解率显著低于 WCGF。WCGF 的 CP 降解快，慢速降解部分含量和慢速降解部分的降解速率显著高于 DCGF，原因可能是加热烘干过程中蛋白质变性，导致降解特性改变。NRC（2001）[7]提出加热处理会降低饲料 CP 的可利用性，因此 RUP 含量的差异很可能是由于加热处理导致。2 种饲料 NDF 在 24 h 之内降解率均较慢，24 h 之后大量降解，NDF 有效降解率差异不

显著，说明烘干过程不影响饲料纤维的可利用性。Hristov 等[24]报道了 WCGF 的高比重使其瘤胃滞留时间短，饲粮瘤胃通过率更高。因其提供的纤维是非饲草性短纤维，该纤维比重较大，在瘤胃内滞留时间相对短，因此，Allen 等[25]提出了在含有玉米纤维饲料的饲粮中添加适当的苜蓿干草，可以提高饲粮瘤胃滞留时间和饲粮瘤胃 NDF 降解率。

3.3 DCGF 和 WCGF 蛋白质小肠消化特性

RUP 和微生物蛋白质进入小肠后，其消化过程与单胃动物相似，在小肠内依靠胰蛋白酶等的水解作用形成游离氨基酸，经小肠上皮细胞吸收，这 2 者构成总可消化蛋白质。本试验中，DCGF 的 RUP 的小肠消化率显著低于 WCGF，可能是 DCGF 在加工过程中蛋白质结构有所改变，造成与纤维素结合的蛋白质含量的变化，进而影响蛋白质的消化率。较低的蛋白质消化率导致 DCGF 的小肠可吸收 RUP、代谢蛋白质含量与 WCGF 相近。饲料蛋白质的营养价值取决于代谢蛋白质的含量[15]。

3.4 DCGF 和 WCGF 对真可吸收蛋白质供给量的预测

根据 NRC 模型，饲料总可消化养分由可消化 CP、可消化 NDF、可消化 NFC 和可消化 FA 含量决定，DCGF 的 NDF 含量高于 WCGF，而 WCGF 含有较多的 NFC，因此 2 种饲料总可消化养分含量差异不显著，即在能量供给方面 2 种饲料的营养价值相近。尽管 2 种饲料 RUP 含量不同，但 2 种饲料 RUP 的小肠消化率的差异导致 2 种饲料小肠可吸收 RUP 含量无显著差异。在 NRC 模型中，微生物蛋白质含量与饲料的总可消化养分含量呈正相关，本试验中，DCGF 的微生物蛋白质含量与 WCGF 差异不显著。微生物蛋白质中 80%为真蛋白质，其在小肠内的吸收率约为 80%；瘤胃内源氮（含 80%真蛋白质）的含量与饲料 DM 含量呈正相关，且有 50%的内源真蛋白质可到达十二指肠被吸收利用，故 WCGF 的内源真蛋白质和小肠可吸收内源真蛋白质含量显著低于 DCGF。进入小肠的代谢蛋白质由小肠可吸收 RUP、小肠可吸收微生物蛋白质、小肠可吸收内源真蛋白质组成，WCGF 的代谢蛋白质含量与 DCGF 无显著差异，故从代谢蛋白质角度来看，二者的营养价值也相近。

3.5 DCGF 和 WCGF 必需氨基酸营养价值

由饲料 RUP、瘤胃微生物蛋白质和内源真蛋白质所提供的各种氨基酸是体组织和乳蛋白合成必不可少的原料。此外，少量氨基酸也是机体合成其他代谢物所必需的前体物质。本试验中分别测定了 DCGF 和 WCGF 的 10 种必需氨基酸含量，其中 WCGF 各必需氨基酸含

量与潘春芳[3]研究的结果相近，DCGF 各必需氨基酸含量与林谦等[1]研究结果相近。由于 2 种饲料 RUP 含量差异显著，造成 DCGF 的 RUP 提供的 TEAA 含量显著高于 DCGF。研究表明，代谢蛋白质用于蛋白质合成的效率取决于代谢蛋白质中必需氨基酸的比例与动物需要比例的的匹配程度以及代谢蛋白质中 TEAA 含量[7]。绝大多数研究表明。Lys 和 Met 是奶牛代谢蛋白质中的第 1 限制性必需氨基酸，但是 Met 和 Lys 的限制性顺序取决于二者在 RUP 中的相对含量[26]。当由玉米或其副产物提供饲粮中大部分或全部 RUP 时，Lys 为奶牛的第 1 限制性氨基酸[27]。估测饲料可消化氨基酸的供给量，要考虑 2 个“氨基酸池”，第 1 个“池”是 RUP 提供的必需氨基酸含量。第 2 个“池”为微生物蛋白质和内源真蛋白质的必需氨基酸含量。本试验中只考虑了 RUP 提供的必需氨基酸含量。由于 DCGF 的瘤胃 CP 降解率较低，RUP 提供了较多的必需氨基酸，但其 RUP 的小肠消化率显著低于 WCGF，可能会影响必需氨基酸的营养价值。

4 结 论

① DCGF 和 WCGF 均含有高含量的可利用纤维和可降解蛋白质，可以作为奶牛的纤维、蛋白质源饲料。

② DCGF 和 WCGF 的瘤胃 NDF 降解率差异不显著，但 DCGF 的瘤胃 CP 降解率和 RUP 的小肠消化率有所降低，影响其蛋白质的营养价值。

③ DCGF 和 WCGF 为奶牛提供的总可消化养分和微生物蛋白质差异不显著，二者在代谢蛋白质供应方面营养价值相近。

④ DCGF 的 RUP 提供的总必需氨基酸含量高于 WCGF，但 DCGF 较低的 RUP 的小肠消化率可能降低氨基酸的营养价值。

参考文献：

[1] 林谦,戴求仲,蒋桂韬,等.玉米及其加工副产品的营养价值评定[J].中国饲料,2013(4):18–21.

[2] 段玉权.玉米淀粉生产中浸泡工艺的研究[D].硕士学位论文.沈阳:沈阳农业大学,1999.

[3] 潘春芳.湿玉米纤维饲料在奶牛生产中的应用及其保存技术的研究[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2014.

[4] 张丽,高腾云.玉米淀粉渣在奶牛饲养中的应用[J].中国奶牛,2011(6):21–25.

[5] HANNAH S M,PATERSON J A,WILLIAMS J E,et al.Effects of corn vs corn gluten feed on site,extent and ruminal rate of forage digestion and on rate and efficiency of gain[J].Journal of Animal Science,1990,68(8):2536–2545.

[6] FIRKINS J L,EASTRIDGE M L,PALMQUIST D L.Replacement of corn silage with corn gluten feed and sodium bicarbonate for lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1991,74(6):1944–1952.

[7] NRC.Nutrient requirement of dairy cattle[S].7th ed.Washington,D.C.:National Academy Press,2001.

[8] 冯仰廉,陆治年.奶牛营养需要和饲料成分[M].3 版.北京:中国农业科技出版社,2007.

[9] AOAC.Official methods of analysis of AOAC international[S].16th ed.Arlington:Association of Official Analytical Chemists,1997.

[10] 张旭,蒋桂韬,王向荣,等.酶法测定谷物副产品中淀粉含量[J].广东饲料,2013,22(10):33–35.

[11] VAN SOEST P J,ROBERTSON J B,LEWIS B A.Methods for dietary fiber,neutral detergent fiber,and non-starch polysaccharides in relation to animal nutrition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(10):3583–3597.

[12] SNIFFEN C J,CONNOR J D,VAN SOEST P J,et al.A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets:Ⅱ.Carbohydrate and protein availability[J].Journal of Animal Science,1992,70(11):3562–3577.

[13] NUEZ-ORTÍN W G,YU P Q.Estimation of ruminal and intestinal digestion profiles,hourly effective degradation ratio and potential N to energy synchronization of co-products from bioethanol processing [J].Journal of Science Food Agriculture,2010,90(12):2058–2067.

[14] ØRSKOW E R,MCDONALD I.The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to the rate of passage[J].Journal of Agricultural Science Cambridge,1979,92(2):499–503.

[15] CALSAMIGLIA S,STERN M D.A three-step *in vitro* procedure for estimating intestinal digestion of protein in ruminants[J].Journal of Animal Science,1995,73(5):1459–1465.

[16] YU P,GOELEMA J O,TAMMINGA S.Using the DVE/OEB model to determine optimal conditions of pressure toasting on horse beans (*Vicia faba*) for dairy feed industry[J].Animal Feed Science and Technology,2000,86(3/4):165–176.

[17] 周小乔.粗饲料来源和能量供应对奶牛乳蛋白合成调控的影响[D].博士学位论文.哈尔滨:东北农业大学,2015.

[18] STAPLES C R,DAVIS C L,MCCOY G C,et al.Feeding value of wet corn gluten feed for lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,1984,67(6):1214–1220.

[19] BERNARD J,DELOST RC,MUELLER F,et al.Effect of wet or dry corn gluten feed on nutrient digestibility and milk yield and composition[J].Journal of Dairy Science,1991,74(11):3913–3919.

[20] [美]国家科学研究委员会.奶牛营养需要[M].孟庆翔,译.中国农业大学出版社,2002.

[21] 李洋,王明君,李仲玉,等.不同比例的湿玉米纤维饲料对奶牛瘤胃降解规律与表观消化率的影响[J].中国畜牧杂志,2015,51(7):54–59.

[22] 刁其玉,屠焰.奶牛常用饲料蛋白质在瘤胃的降解参数[J].乳业科学与技术,2005,27(2):70–74.

[23] KASKE M,ENGELHARDT W V.The effect of size and density on mean retention time of particles in the gastrointestinal tract of sheep[J].British Journal of Nutrition,1990,63(3):457–465.

[24] HRISTOV A N,AHVENJRVI S,MCALLISTER T A,et al.Composition and digestive tract retention time of ruminal particles with functional specific gravity greater or less than 1.02[J].Journal of Animal Science,2003,81(10):2639–2648.

[25] ALLEN D M,GRANT R J.Interactions between forage and wet corn gluten feed as sources of fiber in diets for lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science,2000,83(2):322–331.

[26] ABE M,IRIKI T,FUNABA M,et al.Limiting amino acids for a corn and soybean meal diet in weaned calves less than three months of age[J].Journal of Animal Science,1998,76(2):628–636.

[27] KING K J,BERGEN W G SNIFFEN C J,et al.An assessment of absorbable lysine

requirements in lactating cows[J].Journal of Dairy Science,1991,74(8):2530–2539.

Effects of Different Processing Techniques on Nutritional Value of Corn Gluten Feed

HAO Xiaoyan LIU Yan ZHANG Guangning SUN Kaijing WANG Xinying YANG Jinshan ZHANG Yonggen*

(*College of Animal Science and Technology*，*Northeast Agricultural University*，*Harbin* 150030，*China*)

Abstract: This trail was conducted to evaluate the effects of processing technology on the nutritional value of corn gluten feed using wet corn gluten feed (WCGF) and dry corn gluten feed (DCGF) as ingredients. Three ruminally cannulated Holstein cows in dry period were selected as experimental animals. Nutrient composition contents of DCGF and WCGF were determined by common methods, nylon-bag technique was used to evaluate rumen degradation characteristics of DCGF and WCGF, intestinal digestibility of rumen undegraded protein (RUP) of DCGF and WCGF was determined using *in vitro* three steps method, and NRC model was used to determine supplemental amounts of metabolizable protein and essential amino acids. The results showed as follows: 1) except contents of neutral detergent fiber（NDF）， neutral detergent insoluble crude protein （NDICP） and acid detergent insoluble crude protein （ADICP）, nutrient contents of DCGF and WCGF were not significantly different (P>0.05). 2) Compared with WCGF, dry matter (DM) (4, 24 and 48 h) and crude protein (CP) degradability (12, 24, 48 and 72 h) of DCGF were lower significantly (P<0.05), but NDF degradability was not significantly different between two feeds (P>0.05). 3) RUP content of DCGF was significantly higher than that of WCGF (P<0.05), and there were no significant differences of contents of total digestible nutrients, microbial protein and metabolism protein between two feeds (P>0.05). 4) Compared with WCGF, intestinal digestion of RUP of DCGF was significantly lower (P<0.05), but total digestible protein was not significantly different (P>0.05). 5) Among essential amino acids provided by RUP, contents of histidine, phenylalanine, isoleucine and total essential amino acids provided by RUP of DCGF were significantly higher than those of WCGF (P<0.05). In conclusion, there are high

*Corresponding author, professor, E-mail: zhangyonggen@sina.com

（责任编辑 王智航）

contents of available fiber and protein in DCGF and WCGF, which can be used as fiber and protein feed for dairy cows， but low degradability of CP and small intestinal digestibility of RUP of DCGF may affect their nutritional values of protein and amino acids.

Key words: corn gluten feed; rumen degradability; intestinal digestibility; amino acid